



проводимых измерений. Разработанное программное обеспечение позволяет выполнить пересчет диаграмм направленности из ближней зоны в дальнюю.

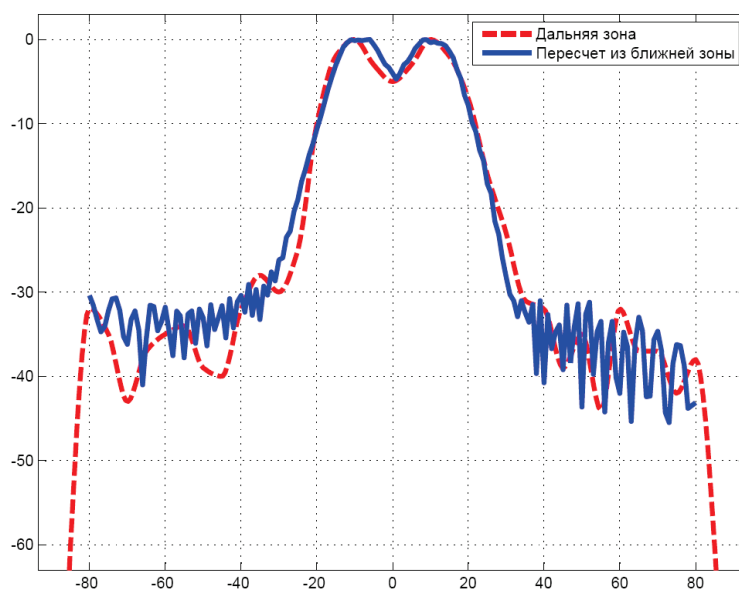


Рис. 6. Диаграмма направленности в дальней зоне

Литература:

1. Захарьев Л.Н, Леманский А.А., Турчин В.И., Цейтлин Н.М., Щеглов К.С. Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Издательство «Радио и связь», 1985. С. 71 – 128, 136-206
2. Бахрах Л.Д. и др. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне. Л.: Наука, 1985.

Статья отправлена: 06.06.2017

© Набилков В.Д., Фомичев Н.И., Беляев А.А.

ЦИТ: ua217-046

DOI: 10.21893/2415-7538.2017-06-1-046

УДК 608.2

Окулов В.И., Пуляев И.А.

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА НА СОВРЕМЕННОМ ЭТАПЕ

Одесский национальный морской университет,  
Одесса, Мечникова 34, 65029

Okulov V.I., Pulyaev I.A.

### PROSPECTS OF APPLICATION OF STIRLING ENGINE AT THE PRESENT STAGE

Odessa National Maritime University,  
Odessa, Mechnikova 34, 65029

*Аннотация. В статье проводится анализ применения в настоящее время двигателей Стирлинга, и даются рекомендации по наиболее перспективным*



областям их использования. Показано, что в настоящее время использование двигателя Стирлинга наиболее перспективно в системах, где тепловая энергия для его работы может быть получена не от сжигания топлива в камере сгорания самого двигателя, а от вторичного источника тепла с подходящей температурой.

*Ключевые слова:* двигатель Стирлинга, тепловая энергия, солнечная энергия, энергетический баланс, утилизация тепловой энергии.

*Abstract:* The article analyzes the application of Stirling engines up-to-date, and gives recommendations on the most promising areas of their use. It is shown that at present time the use of the Stirling engine is most promising in systems where the thermal energy for its operation can be obtained not from combustion of fuel in the combustion chamber of the engine itself but from a secondary heat source with a suitable temperature.

*Key words:* Stirling engine, heat energy, solar energy, energy balance, utilization of thermal energy.

История развития техники имеет немало примеров второго рождения различных технических идей, наглядным подтверждением чему может служить возрождение в конце 30-х годов 20 века интереса к тепловым двигателям с внешним подводом тепла (ДВПТ) известным под обобщенным названием двигателя Стирлинга (ДС).

Побудительной причиной стали изыскания радиотехнической фирмы Филипс, направленные на создание портативного электрогенератора с тепловым двигателем, благодаря которому, по мнению экспертов, можно было бы кардинально улучшить сбыт продукции фирмы в тех районах земного шара, где нет электричества [1], [2].

В результате проведенных изысканий к началу 50-х годов 20 века был создан опытный образец ДС, который был многотопливным, отличался бесшумностью в работе, малой токсичностью, а по величине к.п.д, равного 39% [1], превосходил двигатели внутреннего сгорания (ДВС) того времени, но в связи с достигнутыми на то время успехами по уменьшению энергопотребления радиотехнических устройств, идея портативного электрогенератора стала не актуальной, и в серийное производство этот двигатель запущен не был.

Тем не менее, фирма Филипс, понимая ценность полученных результатов, продолжила дальнейшие исследования по ДС.

Результаты этих исследований в 60-х и 70-х годах 20 века были проданы фирмам Джэнэрал Моторс, Форд (США), МАН (ФРГ), Юнайтэд Стирлинг (Швеция), которые создали большую гамму ДС как по мощности, так и по назначению.

По оценкам экспертов предполагалось, что ДС благодаря своим достоинствам, получат широкое распространение, в первую очередь, в качестве силовых установок на наземном и водном транспорте, в 1980 году начнется их серийное производство, и к 1985 году объем выпуска таких двигателей составит до 10% от общего количества производимых тепловых двигателей [3].

Однако, не смотря на то, что на дворе уже второе десятилетие двадцать



первого века, эти прогнозы не оправдались, и ДС потеснить ДВС на транспорте не удалось.

В то же время, учитывая множество положительных качеств ДС, есть все основания полагать, что в настоящее время есть ниши, в которых эти двигатели могут быть востребованы, при условии более полной адаптации существующих схем и конструкций ДС к конкретным условиям эксплуатации.

Поэтому задачей данной статьи является предварительное определение областей, где в настоящее время применение ДС может быть наиболее целесообразным, а также выбор конструктивных схем ДС и подбор технических решений, которые были бы оптимальны для предполагаемых условий эксплуатации данных двигателей.

Обзор публикаций [3], [4], в которых рассматриваются вопросы теории и конструкции ДС и приводятся характеристики таких двигателей, созданных в 60-е - 80-е годы 20 века, позволяет прийти к заключению, что с целью повышения энергетических показателей ДС до уровня, позволяющего им конкурировать с ДВС, их разработчики были вынуждены осуществить следующие основные мероприятия:

- для получения более высокого к.п.д. ввести в конструкцию двигателя регенеративные теплообменники (регенераторы), расположенные снаружи цилиндров, и перейти на использование в качестве рабочего тела вместо атмосферного воздуха на гелий или водород;

- для достижения удельной мощности, сопоставимой с аналогичными показателями ДВС, давление цикла было увеличено, и в выполненных конструкциях составило, в среднем, от 10 до 20 МПа.

В тоже время, осуществленные мероприятия поставили перед конструкторами новые проблемы [3], [4].

Переход на использование в качестве рабочего тела водорода или гелия потребовал создания высокоэффективных уплотнений штока рабочего поршня с целью избежать утечки этих газов за пределы рабочих объемов, так как водород взрывоопасен, а гелий дорог. Несмотря на то, что такие уплотнения были созданы (типа «выворачивающийся чулок» и скользящее уплотнение ленинградского типа), но они остаются слабым звеном ДС, и зачастую долговечность (ресурс) двигателя определялся именно сроком службы этих уплотнений.

Применения регенераторов поставило задачу исключить попадание смазочного масла в рабочее пространство двигателя. Так как, при его попадании на поверхности нагревателя и верхней части регенератора, работающих при температуре от 550 до 700 °С, начинается коксования масла, что приводит, во-первых, к увеличению гидравлического сопротивления тракта регенератор – нагреватель – охладитель, а во-вторых, жидкая пленка смазочного масла, попавшая на поверхность охладителя снижает коэффициент теплоотдачи, что, в свою очередь, отрицательно влияет на его эффективность.

Таким образом, значительно усложнилась конструкция ДС, а следовательно и их стоимость.

С учетом того, что разработчики и производители ДВС также не теряли



времени зря, и вели работы по улучшению экономичности ДВС, уменьшению их токсичности, ДС в настоящее время не в состоянии конкурировать с ДВС как транспортные двигатели.

Целью статьи является поиск областей, где в настоящее время наиболее перспективно применения ДС.

Для определения таких областей представляется целесообразным обратить внимание на некоторые моменты, характеризующие ДС.

Таких моментов может быть выделено как минимум три:

- источники тепловой энергии, которые могут быть использованы для обеспечения работы ДС;
- особенности энергетического баланса ДС;
- обратимость рабочего цикла ДС.

Тепловая энергия для работы ДС может быть получена не только от сжигания топлива в камере сгорания, но и от любого источника тепла с подходящей температурой, в качестве которого можно использовать тепловую энергию отработавших газов ДВС, энергию отходящих газов котельных установок и солнечную энергию.

Возможным направлением использования тепловой энергии отработавших газов ДВС и отходящих газов котельных установок представляется разработка электрогенерирующих систем типа «тепловой двигатель-электрогенератор» (ТД-ЭГ), где в качестве приводного двигателя используется ДС.

Прежде всего, такая система имеет перспективу для утилизации теплоты отработавших газов современных главных судовых дизельных двигателей, в которых значительная часть тепловой энергии, полученной от сгорания топлива, теряется с отработанными газами. Так, согласно имеющимся данным [5], эти потери составляют от 28 до 40 процентов в зависимости от типа главного двигателя.

Ранее для утилизации тепловой энергии главных судовых двигателей по схеме ТД-ЭГ на торговом флоте использовались утилизационные турбогенераторы.

В настоящее время, в связи с тем, что паровые турбины как главные судовые двигатели на судах торгового флота вытеснены малооборотными дизелями, исчезли и утилизационные турбогенераторы, и логично было бы предположить, что освободившуюся нишу вполне могут занять утилизационные электрогенераторы, где в качестве приводного двигателя возможно использование ДС.

Также одним из возможных направлений использования ДС может быть выработка электрической энергии путем преобразования в нее энергии Солнца.

По оценкам [6] мощность солнечного излучения, попадающего на единицу площади земной поверхности, (при условии перпендикулярного падения солнечных лучей на поверхность и без учета ослабления излучения при прохождении земной атмосферы) составляет  $1,4 \text{ кВт/м}^2$ .

Если сконцентрировать эту энергию, например, с помощью параболического зеркала, то ее можно использовать для работы ДС, объединенного с генератором электроэнергии.



С учетом всех возможных потерь солнечной энергии и предварительного предположения, что общий к.п.д. такого устройства вряд ли будет выше 15-17 %, то даже при использовании параболического концентратора диаметром в  $1 \text{ м}^2$ , можно получить мощность от 160 до 190 Вт, чего вполне достаточно, при использовании современных светодиодных ламп, для освещения небольшого частного дома.

В тех случаях, когда использование солнечной энергии для обеспечения работы такого генератора невозможно (пасмурная погода или ночь), работу генератора можно обеспечить за счет тепловой энергии, полученной от сжигания органического топлива (в наиболее простом и примитивном случае - от костра).

Актуальность использования ДС в качестве приводного двигателя генераторной установки, использующей тепловую энергию отходящих газов котельных установок, объясняется возросшим в последнее время интересом к системам автономного теплоснабжения индивидуальных жилых домов.

Применяемые для отопления индивидуальных жилых домов твердотопливные и газовые котлы имеют в своем составе ряд узлов и агрегатов, для работы которых требуется электроэнергия.

Для обеспечения полной автономности подобных систем теплоснабжения необходимо обеспечить их работоспособность при отключении (по техническим или организационным причинам) централизованной подачи электроэнергии

Обеспечить в таком случае котельную установку электроэнергией можно либо за счет электрогенератора с ДВС, либо за счет применения резервного аккумулятора, работающего в паре с инвертором, преобразующим напряжение 12 вольт постоянного тока в 220 вольт переменного тока синусоидальной формы.

В тоже время, оба эти способа имеют существенные недостатки. Электроснабжение от генератора с экономической точки зрения связано с существенными финансовыми затратами, а от аккумулятора возможно в течение ограниченного времени.

С учетом того, что к.п.д. котлов, применяемых для отопления, по данным фирм-изготовителей [7], [8] составляет, в среднем, 80 %, то оставшиеся 20 % вполне могут быть использованы для выработки необходимого количества электроэнергии путем применения электрогенератора с приводом от ДС.

Также перспективным направлением использования ДС следует считать их применение в централизованных системах теплоснабжения жилых и административных зданий больших городов.

Примером такой системы может служить котельная, предназначенная для теплоснабжения жилых и административных зданий городского микрорайона.

Тепловая энергия, с помощью которой в котельной происходит нагрев теплоносителя, вырабатывается за счет сжигания газообразного, жидкого или твердого углеводородного топлива. В тоже время, для работы, как котла, так и для перекачки теплоносителя от котельной к потребителям необходима электроэнергия, которой котельная обеспечивается централизованно.



В случае отключения централизованного электроснабжения, для обеспечения работы котельной необходим автономный источник электроэнергии, в качестве которого, как правило, применяется дизель-генератор.

Существующая номенклатура дизель - генераторов позволяет без проблем обеспечить полноценную работу котельной, но при этом существенно возрастает стоимость вырабатываемой электроэнергии, так как только порядка 37 % энергии, содержащейся в дизельном топливе, переходит в полезную работу дизель - генератора [2].

Остальная энергия безвозвратно теряется, причем баланс потерянной энергии [2] выглядит следующим образом:

- потери на привод вспомогательных механизмов – 2 %;
- потери на трение – 7 %;
- теплота, отдаваемая жидкости в системе охлаждения – 19 %;
- теплота, уносимая отработавшими газами – 35 %.

Для повышения экономичности дизель-генераторной установки, система охлаждения последней закольцовывается с общей системой теплоснабжения котельной и теплота, полученная в системе охлаждения, не выбрасывается без пользы в окружающую среду, а используется, наряду с тепловой энергией, полученной при сжигании топлива в котле, для дополнительного подогрева теплоносителя.

В случае замены дизель - генератора на генератор с приводом от ДС, тепловой баланс генераторной установки [2] будет выглядеть следующим образом:

- полезная работа – 36 %;
- потери на привод вспомогательных механизмов – 4 %;
- потери на трение – 4 %;
- теплота, отдаваемая жидкости в системе охлаждения – 47 %;
- теплота, уносимая отработавшими газами – 9 %.

Отсюда видно, что с экономической точки зрения, эффективность электрогенератора с приводом от ДС, будет выше, чем при использовании дизель-генераторной установки.

Так же перспективным направлением использования ДС является то, что они обладают обратимостью цикла, то есть, если привести в движение ДС от постороннего источника механической энергии, то ДС будет работать как холодильная машина.

Упомянутый ранее портативный генератор электрогенератор, работающий за счет использования солнечной энергии при подключении его к электросети, будет работать как холодильник.

Исходя из выше изложенного, можно сделать следующие выводы:

1. На современном этапе развития техники ДС не имеют перспектив заменить ДВС на транспорте.
2. Наиболее перспективно в настоящее время применение ДС для утилизации тепловой энергии.
3. Направлением дальнейшего исследования должно быть определение



наиболее рациональных схем ДС, предназначенных для утилизации тепловой энергии, позволяющих упростить конструкцию ДС, пусть даже за счет снижения эффективного к.п.д.

Литература:

1. Смирнов Г.В. Двигатели внешнего сгорания, М.: Знание, 1967-31с, ил.
2. Мышинский Э.А., Рыжков-Дудонов М.А. Судовые поршневые двигатели внешнего сгорания (двигатели Стирлинга) Л.: Судостроение, 1976 - 76 с., ил.
3. Ридер Г., Хупер Ч., Двигатели Стирлинга: пер. с англ.-М.: Мир, 1986-464 с., ил.
4. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга: пер. с англ.: -М.: Энергия, 1978-152 с.. ил.
5. Судовые энергетические установки/Г.А.Артемов, В.П.Волошин, А.Я.Шквар - Л.: Судостроение, 1987, 480 с., ил.
6. Кухлинг Х. Справочник по физике: пер. с нем.-М.: Мир, 1982.-520с, ил.
7. Тепло без границ [Электронный ресурс] /Режим доступа [www/URI.:http://www.dtm.ee](http://www.dtm.ee)14.04.2017 г.
8. Котлы отопления: Каталог 2015 [Электронный ресурс] /Режим доступа [www/URI.:http://galmet.com/](http://galmet.com/) 14.04.2017 г.

Статья отправлена: 05.06.2017 г.

© Окулов В.И., Пуляев И.А.

ЦИТ: ua217-013

DOI: 10.21893/2415-7538.2017-06-1-013

УДК 681.5.015:622.24

Кропивницька В.Б.

## МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Карпатська 15, 76019*

Kropyvnytska V.

## METHODOICAL APPROACHES TO OPTIMIZATION OF PROCESS CONTROL OF DRILLING WELLS

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
Ivano-Frankivsk, Carpathian 15, 76019*

*Анотація. Проведено аналіз методичних підходів до оптимізації управління процесом буріння свердловин. Визначено джерела і види невизначеності, у широкому діапазоні яких має функціонувати система управління. Запропоновано для визначення проблеми оптимізації управління бурінням свердловин використовувати інтелектуальні технології управління, що поєднують два ефективні методи сучасної теорії управління – адаптивний і робастний.*

*Ключові слова: управління, оптимізація, методичні підходи, процес буріння*